

KARAKTERISTIK ARUS FILM TIPIS CeO_2 DAN Nd-CeO_2 YANG DIDEPOSISIKAN DI ATAS SUBSTRAT $\text{Si}(100)$ MENGUNAKAN TEKNIK *PULSED-LASER* *ABLATION DEPOSITION (PLAD)*

Iis Nurhasanah^{1,2}, Khairurrijal², Mikrajudin Abdullah², Bambang Ariwahjoedi³,
Maman Budiman² dan Sukirno²

¹Jurusan Fisika FMIPA - UNDIP

Jl. Prof. H. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang 50275

²K.K. Fisika Material Elektronika - ITB

Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

³K. K. Kimia Inorganik dan Fisik, FMIPA - ITB

Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

ABSTRAK

KARAKTERISTIK ARUS FILM TIPIS CeO_2 DAN Nd-CeO_2 YANG DIDEPOSISIKAN DI ATAS SUBSTRAT $\text{Si}(100)$ MENGGUNAKAN TEKNIK *PULSED-LASER ABLATION DEPOSITION (PLAD)*. Karakteristik arus film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 yang dideposisikan di atas substrat p-Si(100) menggunakan teknik *Pulsed-Laser Ablation Deposition (PLAD)* telah diamati melalui pengukuran arus-tegangan (I-V). Film tipis CeO_2 memiliki rapat arus yang lebih besar 2 orde dari film tipis Nd-CeO_2 . Perbedaan rapat arus dapat dijelaskan berdasarkan perbedaan orientasi kristal, keadaan trap dan tinggi potensial penghalang. Mekanisme konduksi yang terjadi terutama adalah *Space-Charge Limited Current (SCLC)* pada tegangan rendah dan emisi Schottky pada tegangan tinggi. Diketahui pula bahwa potensial penghalang film tipis Nd-CeO_2 lebih besar dari film tipis CeO_2 dan memberikan kontribusi terhadap penurunan rapat arus.

Kata kunci : Dielektrik, Nd-CeO_2 , karakteristik I-V, *SCLC*, emisi Schottky

ABSTRACT

CURRENT CHARACTERISTICS OF CeO_2 AND Nd-CeO_2 THIN FILM DEPOSITED ON $\text{Si}(100)$ BY *PULSED-LASER ABLATION DEPOSITION (PLAD)*. Current characteristics of CeO_2 and Nd-CeO_2 thin films deposited on p-Si(100) by using pulsed-laser ablation deposition (PLAD) technique have been investigated by current-voltage (I-V) measurement. The current density of CeO_2 thin film is higher than Nd-CeO_2 thin film of about two orders. The current density difference may be explained by the different of crystal orientation, state of traps and height barrier potential. The main conduction mechanisms were Space Charge Limited Current (SCLC) at low voltage and Schottky emission at high voltage. It was also found that barrier potential of Nd-CeO_2 thin film is higher than CeO_2 thin film and may contribute to reduce current density.

Key words : Dielectric, Nd-CeO_2 , I-V characteristic, *SCLC*, Schottky emission

PENDAHULUAN

Film tipis berdielektrik tinggi diperlukan sebagai dielektrik alternatif untuk menggantikan SiO_2 pada divais *Metal-Oxide-Semiconductor (MOS)*. Ketebalan lapisan dielektrik dalam *MOS* merupakan salah satu faktor yang menentukan kinerja divais. Usaha reduksi ketebalan lapisan dielektrik SiO_2 dalam *MOS* konvensional menghasilkan peningkatan arus yang tinggi, sehingga secara praktis SiO_2 tidak dapat digunakan lagi [1]. Diantara kandidat material yang diprediksi dapat menjadi dielektrik alternatif adalah kelompok oksida tanah jarang. CeO_2 merupakan salah satu oksida tanah jarang yang telah diakui berpotensi sebagai dielektrik alternatif,

karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan SiO_2 , yaitu: konstanta dielektriknya tinggi (~26), stabilitas termodinamikanya cukup baik dan kompatibel dengan Si. Selain CeO_2 , baru-baru ini Nd_2O_3 mulai dikaji potensinya sebagai dielektrik alternatif [2].

Beberapa peneliti telah mengamati film tipis CeO_2 sebagai dielektrik alternatif yang dideposisikan di atas $\text{Si}(100)$ dan $\text{Si}(111)$ menggunakan teknik *Pulsed-Laser Deposition (PLD)* [3,4], *sputtering* [5] dan *electron-beam evaporation* [6]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa arus pada film tipis CeO_2 sangat ditentukan oleh kristalinitas dan orientasi film. Di lain pihak, besar arus

terutama ditentukan oleh potensial penghalang pada antar muka CeO_2/Si [6]. Namun demikian untuk dapat merealisasikan film tipis CeO_2 sebagai dielektrik alternatif, penelitian mengenai karakteristik film tipis CeO_2 sampai saat ini masih terus dilakukan.

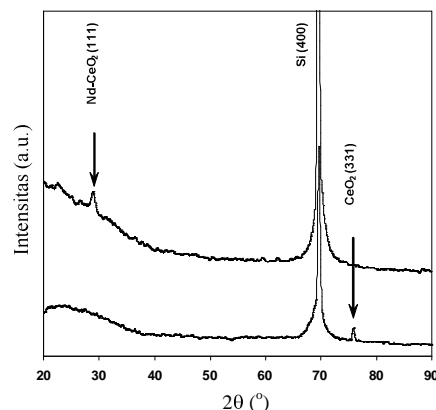
Dalam makalah ini, karakteristik arus film tipis CeO_2 dan CeO_2 yang didadah Nd (Nd-CeO_2) dianalisis agar dipahami proses konduksi arusnya. Dengan demikian dapat diketahui informasi yang lebih detail mengenai faktor-faktor yang dapat mereduksi arus. Pengamatan karakteristik arus film tipis Nd-CeO_2 , khususnya untuk aplikasi sebagai dielektrik alternatif masih jarang dilakukan. Film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 dideposisikan di atas $\text{Si}(100)$ menggunakan teknik Pulsed-Laser Ablation Deposition (PLAD). PLAD merupakan satu dari teknik deposisi secara fisika (Physical Vapor Deposition/PVD) yang dapat menghasilkan film multikomponen dengan komposisi yang hampir sama dengan target dan memungkinkan diperoleh film kristal pada suhu rendah serta secara eksperimen cukup sederhana [7,8].

METODE PERCOBAAN

Film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 dideposisikan di atas substrat $\text{Si}(100)$ tipe-p menggunakan teknik PLAD yang terdapat di laboratorium oksida, Fisika ITB. Substrat Si dibersihkan menggunakan standar RCA cleaning sebelum dimasukkan ke dalam chamber. Jarak target ke substrat adalah 2,5 cm. Target untuk film tipis Nd-CeO_2 dibuat dengan mencampurkan serbuk CeO_2 dan Nd_2O_3 dengan perbandingan 90 % : 10 %. Deposisi dilakukan pada suhu 400 °C selama 60 menit. Dalam eksperimen ini tidak ada proses annealing yang dilakukan setelah deposisi. Ketebalan film diestimasi dari citra penampang Scanning Electron Microscope (JEOL JSM-6360LA) sekitar 100 nm. Fasa dan strukturmikro film diamati menggunakan X-Ray Diffraktometer (X'Pert Pro, PANalytical). Struktur MOS dibuat dengan mendeposisikan Al sebagai kontak logam menggunakan evaporator. Karakteristik arus-tegangan (I-V) diukur menggunakan elektrometer Keithley 617.

HASIL DAN PEMBAHASAN

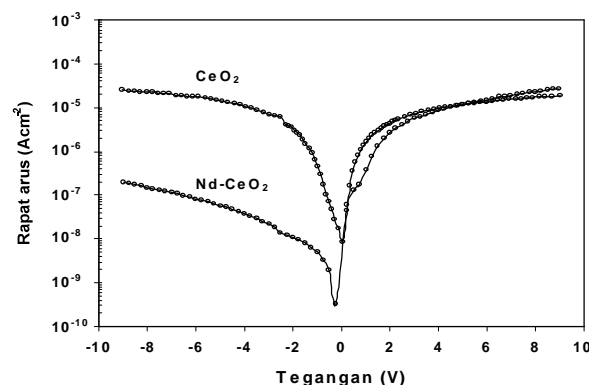
Struktur dan orientasi kristal film memberikan kontribusi terhadap karakteristik arus dalam film tipis dielektrik. Pola XRD pada Gambar 1 menunjukkan bahwa untuk masing-masing film selain puncak $\text{Si}(400)$ teramati pada $2\theta \sim 69^\circ$ juga tampak adanya satu puncak lain dengan intensitas kecil. Pada film tipis CeO_2 puncak di $2\theta \sim 75,54^\circ$ bersesuaian dengan orientasi (331), sedangkan pada film tipis Nd-CeO_2 puncak di $2\theta \sim 28^\circ$ bersesuaian dengan orientasi (111). Hal ini mengindikasikan bahwa film memiliki fasa tunggal dengan struktur kubik fluorit. Walaupun demikian pada 2θ kecil terlihat adanya bumb, sehingga dapat



Gambar 1. Pola XRD film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2

dikemukakan bahwa sebagian film amorf dan belum sepenuhnya kristal.

Untuk mengetahui karakteristik arus yang terjadi dalam film dilakukan pengukuran arus pada tegangan positif dan negatif. Pada kurva arus terhadap tegangan (I-V) yang ditunjukkan dalam Gambar 2, teramati bahwa nilai rapat arus naik secara tajam terhadap pertambahan tegangan. Nilai dan bentuk kurva I-V film tipis CeO_2 pada tegangan negatif dan positif hampir sama, sedangkan untuk film tipis Nd-CeO_2 nilai rapat arus saat diberi tegangan negatif jauh lebih kecil daripada pada saat diberi tegangan positif. Rapat arus pada tegangan negatif (akumulasi) untuk film tipis Nd-CeO_2 lebih kecil sekitar dua orde dari film tipis CeO_2 . Pada tegangan 1V, rapat arus untuk film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 berturut-turut adalah $4,5 \times 10^{-7} \text{ Acm}^{-2}$ dan $5,7 \times 10^{-9} \text{ Acm}^{-2}$. Penyebab perbedaan rapat arus tersebut, salah satunya dimungkinkan karena pengaruh orientasi dan kristalinitas film. Rapat arus film tipis CeO_2 untuk orientasi (200) dan (111) berbeda sekitar setengah orde [5]. Rapat arus film tipis CeO_2 dengan orientasi (331) yang kami peroleh jauh lebih kecil dibandingkan dengan yang diperoleh sebelumnya, dengan demikian film tipis $\text{CeO}_2(331)$ lebih berpotensi sebagai dielektrik alternatif. Perbedaan rapat arus akibat orientasi kristal dan kristalinitas teramati pula pada dielektrik oksida lainnya. Pada film tipis erbiium oksida, perbedaan rapat arus



Gambar 2. Variasi rapat arus terhadap tegangan untuk film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2

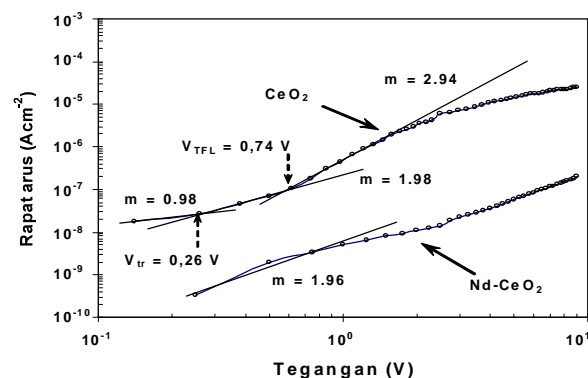
sebesar 1 orde terjadi karena perbedaan kristalisasi [9] dan perbedaan rapat arus pada film tipis bismut titanat diyakini karena adanya hubungan antara sifat listrik dan orientasi kristal [10].

Kemungkinan lain penyebab perbedaan rapat arus dalam film tipis CeO_2 yang kami amati adalah pemberian dadah. Pemberian sejumlah kecil dadah akseptor dapat mereduksi arus yang cukup besar [11]. Secara umum pada material oksida selalu terjadi kekosongan oksigen dalam kisi kristal film. Kekosongan oksigen tersebut berperilaku sebagai cacat (intrinsik) yang menempati suatu keadaan dalam pita energi. Kekosongan oksigen juga dapat terbentuk akibat pemberian dadah akseptor (cacat ekstrinsik), seperti Nd dalam CeO_2 . Berdasarkan hukum netralitas muatan, pemberian dadah akseptor dapat mengurangi elektron bebas. Dengan demikian konduksi arus dalam film tipis CeO_2 akibat elektron bebas dapat tereduksi.

Untuk mengamati penyebab arus karena kekosongan oksigen dan dadah, karakteristik I-V pada tegangan negatif pada Gambar 2 diplot ke dalam skala log. Pada Gambar 3 tampak, untuk film tipis CeO_2 terdapat tiga daerah yang menunjukkan hubungan linier antara variasi arus terhadap tegangan, yaitu pada daerah tegangan di bawah 0,26 V, $m = 0,98$ menyatakan bahwa $J \sim V$ dan proses konduksi bersifat ohmik, pada daerah tegangan berikutnya $m = 1,98$ dan $m = 1,94$.

Sedangkan untuk film tipis Nd- CeO_2 hanya terdapat satu daerah yang mengikuti hubungan linier dengan $m = 1,96$. Rapat arus untuk $m > 1$ dapat dinyatakan sebagai $J \sim V^n$ dan proses konduksi dapat dianalisis berdasarkan kerangka teori *Space-Charge Limited Current (SCLC)*. Karakteristik arus seperti ini disebabkan oleh adanya distribusi keadaan *trap* dalam pita energi yang dinyatakan oleh $n = 2$ untuk *trap* dengan tingkat energi diskrit dan $n > 2$ untuk *trap* dengan tingkat energi eksponensial.

Distribusi *trap* yang terdapat dalam pita energi diperkirakan akibat ketidakaturan struktur dalam kristal film tipis CeO_2 . *Trap* merupakan keadaan terlokalisasi yang muncul dari dadah atau dislokasi. Keberadaan *trap*



Gambar 3. Logaritme variasi arus terhadap tegangan pada bias negatif untuk film tipis CeO_2 dan Nd- CeO_2

menghilangkan sebagian pembawa muatan, karena muatan yang terinjeksi dari elektroda terperangkap dalam cacat yang terlokalisasi dan *immobile*. Dadah Nd dalam CeO_2 menyebabkan kekosongan oksigen semakin besar dan konsentrasi elektron semakin kecil. Dengan demikian konduksi arus dalam film tipis CeO_2 tereduksi dengan adanya dadah Nd.

Karakteristik mekanisme konduksi *SCLC* dinyatakan oleh persamaan [12, 13]:

$$J = \frac{9\epsilon_r\epsilon_o\mu\theta V^2}{8d^3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

dengan, ϵ_r adalah konstanta dielectric film, ϵ_o adalah permitivitas ruang hampa, μ adalah mobilitas, d adalah ketebalan film dan θ adalah perbandingan konsentrasi pembawa muatan bebas terhadap konsentrasi *trap* dan dapat ditentukan berdasarkan [13]:

$$\theta = \frac{en_o d^2}{V_{tr}\epsilon_r\epsilon_s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

n_o adalah konsentrasi pembawa muatan, V_{tr} adalah tegangan transisi antara konduksi ohmik dan *SCLC* yang dikontrol oleh *trap* dengan keadaan energi diskrit. Dengan mengestimasi $V_{tr} = 0,26$ dari kurva pada Gambar 3 dan $n_o = 2,34 \times 10^{19}/\text{m}^3$ ditentukan dari

persamaan $J = en_o\mu\frac{V_{tr}}{d}$, serta asumsi $\mu = 2,8 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{Vs}$ [3], maka dengan menggunakan persamaan (2) diperoleh $\theta = 0,66 \times 10^{-3}$. Rapat keadaan *trap* dihitung dari tegangan *trap-filled limited* (V_{TFL}) menggunakan:

$$N_t = \frac{9\epsilon_r\epsilon_o V_{TFL}}{8ed^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

dengan $V_{TFL} = 0,74 \text{ V}$ yang diperoleh dari kurva pada Gambar 3, konsentrasi *trap* total $N_t = 1,01 \times 10^{23}/\text{m}^3$. Selanjutnya keadaan energi *trap* dapat dihitung dari persamaan:

$$\theta = \left(\frac{N_c}{N_t}\right) \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

dengan $N_c \sim 10^{25}/\text{m}^3$ adalah rapat keadaan efektif pada pita konduksi, k adalah konstanta *Boltzman*, diperoleh $E_c - E_t = 0,33 \text{ eV}$. Jadi keadaan *trap* dalam film tipis CeO_2 terletak 0,33 eV di bawah pita konduksi.

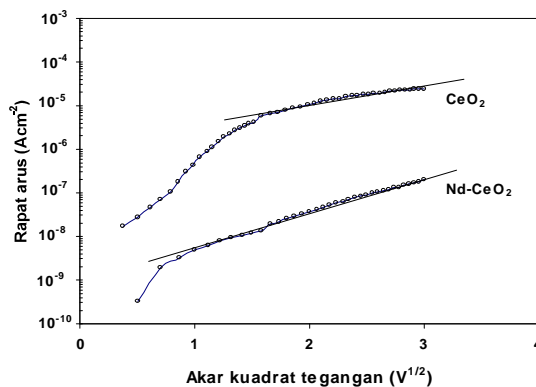
Karakteristik rapat arus untuk film tipis CeO_2 dan Nd- CeO_2 pada tegangan tinggi ditentukan oleh mekanisme emisi *Schottky*. Hal ini dapat dilihat dengan mentransformasikan karakteristik I-V pada Gambar 2 ke dalam bentuk log variasi rapat arus terhadap akar kuadrat tegangan, seperti ditampilkan pada Gambar 4. Mekanisme emisi *Schottky* diungkapkan oleh persamaan [12].

$$J = A^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{SE}}{kT}\right) \exp\left(\frac{\beta_{SE}}{kTd^{1/2}} V^{1/2}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

dengan A^* : konstanta *Richardson*, T : suhu, η_{SE} : tinggi potensial *Schottky*, d : ketebalan film,

$$\beta_{SE} = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}$$

Dari kurva rapat arus pada Gambar 4, terlihat bahwa variasi rapat arus terhadap tegangan mengikuti konduksi emisi *Schottky* mulai pada tegangan 1,6 V dan 1 V berturut-turut untuk film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 . Emisi *Schottky* sangat mungkin terjadi karena celah pita energi film tipis CeO_2 tidak terlalu lebar. Celah pita energi film tipis CeO_2 yang diperoleh dari analisis *taucplot* adalah $\sim 3,27$ eV.



Gambar 4. Logaritme variasi rapat arus terhadap akar kuadrat tegangan pada bias negatif.

Mekanisme emisi *Schottky* merupakan proses injeksi elektron dari elektoda ke dielektrik film akibat penurunan potensial penghalang karena pemberian tegangan. Proses konduksi ini sangat bergantung pada tinggi potensial penghalang antara elektroda dan dielektrik film. Analisis data dari kurva pada Gambar 4 memberikan nilai potensial penghalang $\eta_{SE} = 0,63$ eV untuk film tipis CeO_2 dan $0,81$ eV untuk Nd-CeO_2 . Terlihat bahwa film tipis Nd-CeO_2 memiliki potensial penghalang lebih besar daripada film tipis CeO_2 .

Dengan demikian dapat dikemukakan bahwa penambahan dadah akseptor ke dalam film tipis CeO_2 meningkatkan tinggi potensial penghalang pada antar muka Al/CeO_2 . Peningkatan potensial penghalang ini berkontribusi terhadap penurunan rapat arus. Hal yang sama terjadi pula pada film tipis oksida barium strontium titanat [14, 15], bahwa pemberian dadah akseptor dapat meningkatkan tinggi potensial *barrier* dan secara signifikan mereduksi arus. Selain itu diperoleh pula konstanta dielektrik ϵ_r sebesar 22 dan 32 untuk film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 berturut-turut.

Konstanta dielektrik film tipis Nd-CeO_2 lebih besar dari film tipis CeO_2 dan dari nilai bulknya. Berdasarkan hasil-hasil tersebut dapat dikemukakan bahwa untuk mereduksi arus film tipis CeO_2 diperlukan film berkrystal tunggal dan dapat pula dilakukan pemberian dadah untuk memperbesar tinggi potensial penghalang. Untuk memperoleh nilai optimum konsentrasi dadah terhadap peningkatan potensial penghalang dalam film tipis CeO_2 perlu dilakukan pengamatan lebih lanjut.

KESIMPULAN

Hasil pengamatan memberikan kesimpulan bahwa proses konduksi yang terjadi dalam film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 terutama karena mekanisme *SCLC* dan emisi *Schottky*. Hal yang memberikan kontribusi terhadap rapat arus pada film tipis CeO_2 adalah orientasi kristal, keadaan trap dan tinggi potensial penghalang. Dadah akseptor Nd ke dalam CeO_2 diperkirakan memperbesar tinggi potensial penghalang yang terbentuk pada antar muka Al/CeO_2 dan mereduksi rapat arus. Analisis berdasarkan teori *SCLC* memberikan hasil konsentrasi trap $N_t = 1,01 \times 10^{23}/\text{m}^3$ dengan keadaan energi berada $0,33$ eV di bawah pita konduksi. Potensial penghalang dan konstanta dielektrik diperoleh $0,63$ eV dan $0,81$ eV dan 22 dan 32 untuk film tipis CeO_2 dan Nd-CeO_2 . Film tipis CeO_2 dengan struktur kristal tunggal dan tinggi potensial penghalang yang besar dapat menghasilkan arus kecil dan menjadi dielektrik alternatif yang baik.

DAFTARACUAN

- [1]. G.D. WILK, R.M. WALLACE and J.M. ANTHONY, *J. Appl. Phys.*, **89** (2001) 5243-5275
- [2]. A.A. DAKHEL, *J. of Alloys and Compounds*, **376** (2004) 38-42
- [3]. J. LAPPALAINEN, D. KEK and H.L. TULLER, *J. of Europ. Ceram. Soc.*, **24** (2004) 1459-1462
- [4]. J. KANG, X. LIU, G. LIAN, Z. ZHANG, G. XIONG, X. GUAN, R. HAN and Y. WANG, *Microelectronics Eng.*, **56** (2001) 191-194
- [5]. L. KIM, J. KIM, H. LEE, D. JUNG and Y. ROH, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L564- L566
- [6]. Y. NISHIKAWA, N. TUKUSHIMA, N. YASUDA, K. NAKAYAMA and S. IKEGAWA, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 2480-2483
- [7]. M. J. SCHONING, Y. G. MOURZINA, J. SCHUBERT, W. ZANDER, A. LEGIN, Y. G. VLASOV and H. LUTH, *Electroanalysis*, **13** (2001) 727-732
- [8]. V. CRACIUN, J. M. HOWARD, N. D. BASSIM and R. K. SINGH, *Appl. Surf. Sci.*, **168** (2000) 123-126
- [9]. M.P. SINGH, C. S. THAKUR K. SHALINI, N. BHAT and S. A. SHIVASSHANKAR, *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 2889-2891
- [10]. A.R. CHAUDHURI A. LAHA and S. B. KRUPANIDHI, *Solid State Commun.* **133** (2005) 611-614
- [11]. T. L. CHEN, X. M. LI, W. B. WU, W. D. YU, X.D. GAO and X. ZHANG, *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 132902-1 - 132902-3.
- [12]. S.M. SZE, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Ed., Wiley, New York, (1981)
- [13]. A. O. ODUOR and R. D. GOULD, *Thin Solid Film*, **317** (1998) 409-412
- [14]. K. H. AHN, S. BAIK and S.S. KIM, *J. Appl. Phys.*, **92** (2002) 2651-2654
- [15]. S.S. KIM and C. PARK, *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 2554-2556